



KOROSI

MAJALAH ILMU DAN TEKNOLOGI

April 2013

VOLUME 22 NOMOR 1

**PENINGKATAN KETAHANAN OKSIDASI BAJA AISI 1020 PADA
TEMPERATUR 700°C DENGAN PELAPISAN AL CELUP PANAS**

Mohammad Badaruddin, Suharno

**PENGARUH INHIBITOR SODIUM NITRITE, SODIUM TUNGSTATE, DAN
HEXAMINE SERTA CAMPURANNYA PADA KOROSI SUMURAN BAJA
TAHAN KARAT TIPE 304 TERSENSITASI**

Michelia Alba, S Purwadaria

**ANALISIS KEGAGALAN PADA PIPA ULIR DI LINGKUNGAN
PERMINYAKAN**

Hafid, Adid Andin Hermansyah

**FENOMENA KOROSI PENYEBAB KERUSAKAN PANEL BAJA
ZINCALUME**

Eka Febriyanti

**PENGARUH BEBAN LUAR, SUHU UJI DAN KONSENTRASI TERHADAP
ENVIRONMENT-INDUCED CRACKING PADA PADUAN NI₃(SI,TI) DI
MEDIA LARUTAN NaCl**

Gadang Priyotomo

Pusat Penelitian Metalurgi
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia



KOROSI

MAJALAH ILMU DAN TEKNOLOGI

VOLUME 22 NOMOR 1, April 2013

ISSN 0126 - 3579

DAFTAR ISI

Penanggung Jawab:

Kepala Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI

Dewan Redaksi :

Dr. Efendi Mabruri (Ketua)

Drs. Sundjono

Ir. Ronald Nasoetion, MT

Dr. Solihin

Dr. Ir. Rudi Subagja

Dr. Nono Darsono

Mitrabestari

Prof. Dr. Ir. D.N. Adnyana (BPPT)

Dr. Ir. Bambang Widyanto (INDOCOR)

Dr. Ir. Isdiriyani (ITB)

Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M.S DEA (UD)

Dr. Agus Solehudin, MT. (UPI)

Dr. Eng. Risa Suryana, MT (UNS)

Rusnaldy, Ph.D (UNDIP)

Redaksi Pelaksana:

Yulinda Lestari, ST

Ari Yustisia Akbar, SSi

Gilang Ramadhan, SSi

Fendy Rokhmanto, ST

Nurhayati Indah Ciptasari, M.Si

Sekretariat Redaksi:

Nor Hidayah, SIP

Penerbit:

Pusat Penelitian Metalurgi

LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA

Alamat Sekretariat Redaksi:

Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Gedung 470 Telp: (021) 7560911, Fax: (021) 7560553 E-mail : majalah.korosi@mail.lipi.go.id

Pengantar Redaksi ii

Peningkatan Ketahanan Oksidasi Baja AISI 1020 pada Temperatur 700°C dengan Pelapisan Al Celup Panas

Mohammad Badaruddin, Suharno 1

Pengaruh Inhibitor Sodium Nitrite, Sodium Tungstate, dan Hexamine serta Campurannya pada Korosi Sumuran Baja Tahan Karat Tipe 304 Tersensitasi

Michelia Alba, S Purwadaria 11

Analisis Kegagalan pada Pipa Ulir di Lingkungan Perminyakan

Hafid, Adid Andin Hermansyah 21

Fenomena Korosi Penyebab Kerusakan Panel Baja Zincalume

Eka Febriyanti 29

Pengaruh Beban Luar, Suhu Uji dan Konsentrasi terhadap Environment-Induced Cracking pada Paduan Ni3(Si,Ti) di Media larutan NaCl

Gadang Priyotomo 39

Indeks

PENGANTAR REDAKSI

Syukur Alhamdulillah Majalah Korosi Volume 22 Nomor 1, April 2013 kali ini menampilkan lima buah makalah. Kelima makalah tersebut merupakan hasil kajian dari peneliti di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI sebanyak tiga buah dan dari peneliti instansi lain sebanyak dua buah.

Pembaca yang terhormat,

Makalah pertama yang disajikan oleh Mohammad Badaruddin dan Suharno membahas tentang *Peningkatan Ketahanan Oksidasi Baja AISI 1020 pada Temperatur 700°C dengan Pelapisan Al Celup Panas*. Makalah kedua disajikan oleh Michelia Alba dan S Purwadaria membahas tentang *Pengaruh Inhibitor Sodium Nitrite, Sodium Tungstate, dan Hexamine serta Campurannya pada Korosi Sumuran Baja Tahan Karat Tipe 304 Tersensitasi*.

Selanjutnya Hafid dan Adid Andin Hermansyah membahas tentang *Analisis Kegagalan pada Pipa Ulir di Lingkungan Perminyakan*. Eka Febriyanti membahas tentang *Fenomena Korosi Penyebab Kerusakan Panel Baja Zincalume*. Terakhir adalah Gadang Priyotomo membahas tentang *Pengaruh Beban Luar, Suhu Uji dan Konsentrasi terhadap Environment-Induced Cracking pada Paduan Ni3(Si,Ti) di Media larutan NaCl*.

Kami dewan redaksi mengundang para peneliti dan profesional untuk berbagi ilmu dibidang korosi dan proteksi logam dalam bentuk karya tulis ilmiah di majalah korosi ini. Semoga majalah korosi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Redaksi



KOROSI

Peningkatan Ketahanan Oksidasi Baja AISI 1020 pada Temperatur 700°C dengan Pelapisan Al Celup Panas

Mohammad Badaruddin *, Suharno

*Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung

* email : mbruddin@unila.ac.id

Info dari artikel

Sejarah artikel

Diterima : 24 Desember 2012

Diperbaiki : 11 Februari 2013

Disetujui : 8 Maret 2013

Abstrak

Baja AISI 1020 dilapisi dengan mencelupkan ke dalam bak Al-cair pada temperatur 700°C selama 16 detik. Lapisan yang terbentuk setelah proses pembuatan baja lapis aluminium celup panas adalah: Al dengan sedikit elemen Fe, FeAl₃, dan Fe₂Al₅. Struktur morfologi FeAl₃ dan Fe₂Al₅ masing-masing adalah datar (platelet) dan kolumnar (columnar). Pengujian ketahanan oksidasi baja AISI 1020 yang dilapisi/tidak dilapisi dilakukan pada temperatur 700°C selama periode waktu 49 jam. Konstanta laju kinetika (kp) baja yang tidak dilapisi adalah besarnya dua kali lipat lebih tinggi daripada baja yang dilapisi aluminium. Pembentukan lapisan intermetalik Fe-Al yang terbentuk selama oksidasi berlangsung 9 jam lebih didominasi oleh difusi ke dalam atom-atom Al. Namun bila waktu oksidasi diperlama sampai 49 jam, pembentukan lapisan intermetalik dikontrol oleh difusi ke dalam atom-atom Al dan difusi keluar atom-atom Fe. Fasa intermetalik yang terbentuk pada permukaan baja yang dilapisi setelah oksidasi adalah Fe₂Al₅, FeAl₂, dan FeAl. Aluminium mempunyai dua peranan penting selama oksidasi berlangsung; pertama sebagai suplai untuk pembentukan lapisan protektif Al₂O₃, dan kedua difusi ke dalam untuk pembentukan lapisan intermetalik FeAl₂ dan FeAl.

Kata Kunci: Baja AISI 1020, Al-celup panas, oksidasi, intermetalik, Al₂O₃

Abstract

AISI 1020 steel was coated by dipping into a molten pure Al bath at 700°C for 16 s. The coating layers on the steel substrate formed after aluminizing process are Al layer with a little Fe, FeAl₃, and Fe₂Al₅. The FeAl₃ and Fe₂Al₅ morphologies are platelet and columnar structures, respectively. The oxidation test of bare and aluminized steel were performed at 700°C for a period of time 49 h. The kinetics rate constant of uncoated steel (kp) is two orders of magnitude higher than that of coated steel. The iron oxides formed on the bare steel are hematite (Fe₂O₃), magnetite Fe₃O₄ dan wustite (FeO). The formation of Fe-Al intermetallic layers for the coated steel oxidized for 9 h, is mainly dominated by the inward diffusion of Al. However, after 49 h oxidation the intermetallic phases formation were controlled by interdiffusion of Al and Fe atoms. Intermetallic phases in the aluminide layers consist of Fe₂Al₅, FeAl₂ and FeAl after isothermal oxidation for a periods of time 1-49 h. The aluminum atoms in the intermetallic layer have two roles during oxidation process; one is the outward diffusion of Al to form Al₂O₃ scale, and the other is the inward diffusion of Al toward the steel substrate to form FeAl₂ and FeAl intermetallic phases.

Keywords: AISI 1020 steel, hot-dip aluminizing, oxidation, intermetalik, Al₂O₃

1. Pendahuluan

Proses perancangan komponen pipa uap air dari sumber panas bumi harus selalu diperhatikan dari sisi ketahanan oksidasi dan kekuatan bahan yang digunakan selama aplikasi pada temperatur tinggi. Hal ini perlu dilakukan agar diperoleh rancangan yang optimal baik dari ongkos operasionalnya maupun dari keamanannya [1]. Proses oksidasi selalui diawali terlebih dahulu oleh reaksi antara logam dengan oksigen selama komponen berinteraksi dengan lingkungan [2,3].

Uap panas yang berasal dari sumber panas bumi dapat menyebabkan komponen pipa baja pada jaringan perpipaan, penukar kalor dan tanki reservoir teroksidasi [4]. Oksidasi yang terjadi pada komponen pipa tidak hanya menghasilkan kerusakan secara khusus, tetapi juga meningkatkan biaya perawatan dan ongkos produksi energi listrik. Bahan-bahan tahan korosi seperti stainless steel atau titanium dapat digantikan penggunaannya dengan penerapan pelapisan Al pada baja karbon rendah untuk menurunkan ongkos produksi dan perawatan yang lebih murah [5]. Selain itu, penggunaan inhibitor anorganik [6], asam amino [7], atau polimer yang tahan air seperti poliaspartat [8,9], mampu menurunkan laju korosi, namun pada waktu penggunaan yang cukup lama cenderung meningkatkan laju korosi bila melebihi 100 ppm. Ini artinya bahwa penggunaan inhibitor anorganik atau organik hanya terbatas pada konsentrasi yang rendah dan aplikasi hanya pada temperatur rendah. Solusi yang tepat untuk meningkatkan ketahanan oksidasi baja karbon rendah pada temperatur tinggi dapat dilakukan dengan pelapisan aluminium celup panas. Proses pelapisan ini lebih murah dan sangat efektif untuk komponen yang besar dan bentuknya kompleks seperti pipa [10,11]. Lapisan aluminium yang terbentuk pada permukaan baja karbon dapat menjadi lapisan pelindung baja selama aplikasi pada temperatur tinggi dengan membentuk lapisan protektif Al_2O_3 [12]. Lapisan ini sangat stabil pada temperatur tinggi bahkan pada lingkungan yang mengandung uap panas mampu

melindungi permukaan baja karbon dari oksidasi uap air [13,14]. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perilaku peningkatan ketahanan oksidasi baja AISI 1020 melalui pelapisan Al-celup panas pada temperatur 700°C dalam lingkungan udara kering selama 49 jam.

2. Metode Penelitian

2.1. Spesimen uji

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja AISI 1020 dengan komposisi kimia: 0.2 C, 0.5 Mn, 0.05 P, 0.05 S, Fe-seimbang (wt.%). Spesimen dibuat dengan ukuran 20 mm × 10 mm × 2 mm. Spesimen dilobangi dengan mata bor diameter 1 mm untuk menggantungnya pada saat proses pelapisan. Semua permukaan spesimen diampelas dengan kertas amplas mulai 200 sampai 1200. Kemudian dicuci dengan acetone dan ethanol, lalu dikeringkan dengan pengering udara. Sebelum proses pelapisan Al-celup panas. Semua spesimen dibersihkan dengan menggunakan larutan kimia 5% NaOH, 15% H_3PO_4 kemudian dibilas dengan menggunakan air. Proses pelapisan baja dilakukan dengan mencelupkan ke dalam bak Al-cair pada temperatur 700°C selama 16 detik. Setelah proses pelapisan, oksida yang menempel pada permukaan spesimen kemudian dibersihkan dengan menggunakan campuran larutan kimia $HNO_3 + H_3PO_4 +$ air (1:1:1 dalam volume).

2.2. Pengujian Oksidasi dan Karakterisasi Sampel

Pengujian oksidasi dilakukan pada baja yang tidak dilapisi (*uncoated*) dan dilapisi aluminium (*coated*) pada temperatur 700°C selama 49 jam. Penimbangan berat spesimen sebelum dan sesudah dioksidasi dilakukan menggunakan timbangan analitik dengan ketelitian ± 0.1 mg. Plot kurva penambahan berat (*weight gain*) versus oxidation time (h) dilakukan untuk memprediksi ketahanan oksidasi baja pada temperatur 700°C. Morfologi, mikrostruktur dan komposisi kimia semua sampel dianalisis menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) dan *electron dispersive*

spectroscopy (EDS) dan Optical microscope (OM). Fasa-fasa yang terbentuk dianalisis dengan X-ray diffraction (XRD) dan kemudian dianalisis menggunakan program MATCH Phase Identification.

3. Hasil dan Pembahasan

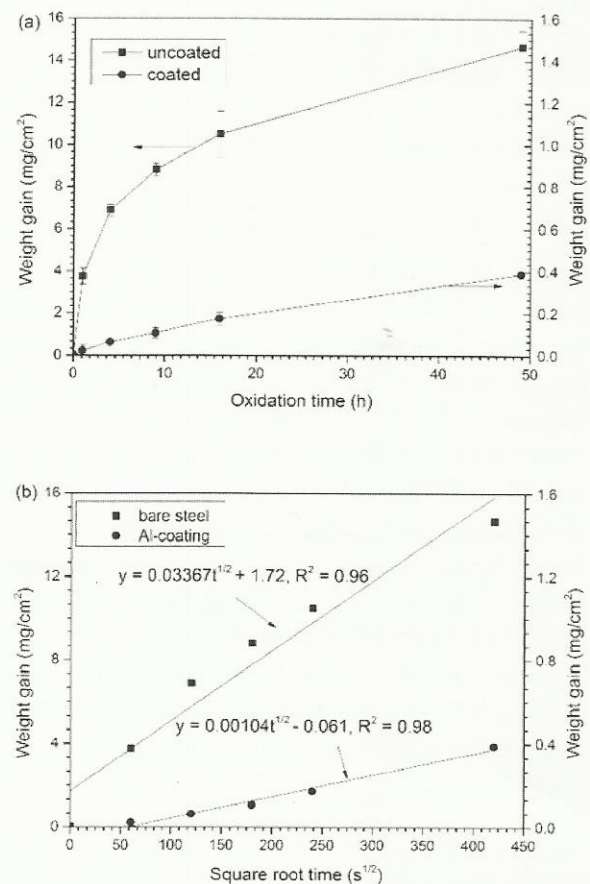
3.1. Hasil Oksidasi Baja Yang Tidak/Dilapisi Aluminium

Data penambahan berat baja AISI 1020 yang tidak/dilapisi Al, diplot pada Gambar 1a. Plot linier dari kurva *weight gain* versus *oxidation time* menunjukkan perilaku oksidasi baja AISI 1020 yang tidak dilapisi, mengikuti tren parabolik. Peningkatan laju oksidasi mengikuti pertambahan waktu oksidasi yang dilakukan, baik untuk baja yang tidak maupun baja yang dilapisi. Gambar 1a menunjukkan dengan jelas peningkatan ketahanan oksidasi baja AISI 1020 setelah dilapisi Al. Nilai *weight gain* untuk baja AISI 1020 yang tidak dilapisi setelah dioksidasi selama 49 jam adalah sekitar 14.59 mg/cm². Sedangkan untuk baja AISI 1020 yang dilapisi Al adalah sekitar 0.39 mg/cm². Sekitar 37 kali penurunan *weightgain* untuk baja yang dilapisi Al. Baja AISI 1020 yang dilapisi Al menunjukkan penurunan yang sangat signifikan terhadap penambahan beratnya bila dioksidasi pada temperatur 700°C selama 49 jam.

Untuk mengetahui secara jelas perilaku oksidasi baja AISI 1020, plot kurva *weight gain* versus *square root time* ($t^{1/2}$) dilakukan untuk menentukan konstanta laju kinetika (k_p). Pierragi [15] menyarankan plot kinetik data $(\Delta W/A_0) = k_p \cdot t^n$ untuk menentukan konstanta laju kinetika secara akurat pada keadaan tunak (*steadystate*).

Regresi linier dilakukan pada Gambar 1b dan diperoleh nilai konstanta laju kinetika (k_p) untuk baja yang tidak dilapisi (*uncoated*): $8.456 \times 10^{-10} \text{ g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$ dan baja yang dilapisi Al (*coated*) adalah $1.073 \times 10^{-12} \text{ g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$. Nilai k_p baja AISI 1020 yang tidak dilapisi menunjukkan besarnya dua kali lipat lebih tinggi daripada baja AISI 1020 yang dilapisi aluminium. Ini

mengindikasikan bahwa ketahanan oksidasi baja AISI 1020 dapat ditingkatkan secara signifikan melalui Al-celup panas dalam lingkungan udara kering.



Gambar 1. (a) Plot *weightgain* terhadap waktu oksidasi dan (b) plot *weight gain* terhadap akar kuadrat waktu oksidasi ($t^{1/2}$)

3.2. Mikrostruktur dan Karakterisasi Sampel Hasil Oksidasi

3.2.1. Baja AISI 1020 yang tidak dilapisi

Observasi permukaan baja AISI 1020 yang dioksidasi pada temperatur 700°C menunjukkan struktur morfologi permukaan oksida yang berbeda, yang tergantung dari periode waktu oksidasi. Morfologi oksida besi yang terbentuk pada permukaan baja AISI 1020 diamati dengan SEM, ditampilkan pada Gambar 2.

Selama oksidasi baja dalam periode waktu 1 jam, oksida besi yang terbentuk menghasilkan bentuk yang mengerut (wrinkle) dan menunjukkan struktur oksida yang berlubang (Gambar 2a). Seiring

dengan peningkatan waktu oksidasi selama 49 jam pengkerutan oksida yang terbentuk pada bagian terluar semakin besar (Gambar 2b). Fenomena pengkerutan oksida besi yang terbentuk selama oksidasi baja pada lingkungan udara kering disebabkan oleh perbedaan tegangan termal (thermal stress) dari pembentukan oksida besi pada permukaan baja dan akhirnya menghasilkan deformasi pada lapisan oksida yang terluar [16].

Dari pengamatan melalui mikroskop optik, penampang permukaan oksida besi yang terbentuk, seperti ditunjukkan pada Gambar 3, pengkerutan lapisan oksida besi bagian terluar hanya terjadi pada lapisan hematit (Fe_2O_3) dimana lapisan ini lebih tipis dibanding lapisan magnetit (Fe_3O_4) dan wustit (FeO). Bila baja karbon rendah dioksidasi pada temperatur tinggi dalam lingkungan atmosfer udara umumnya lapisan oksida yang terbentuk adalah Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , dan FeO [17]. EDS analisis dilakukan pada lapisan oksida yang terbentuk pada baja AISI 1020 setelah isothermal oksidasi pada temperatur 700°C selama 9 h, ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis EDS pada lapisan oksida besi yang terbentuk pada baja AISI 1020

Struktur oksida	Elemen (at.%)		
	O	Mn	Fe
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	65.07	0.04	34.89
Fe_3O_4	59.34	-	0.66
Fe_{1-x}O	50.55	0.96	8.49

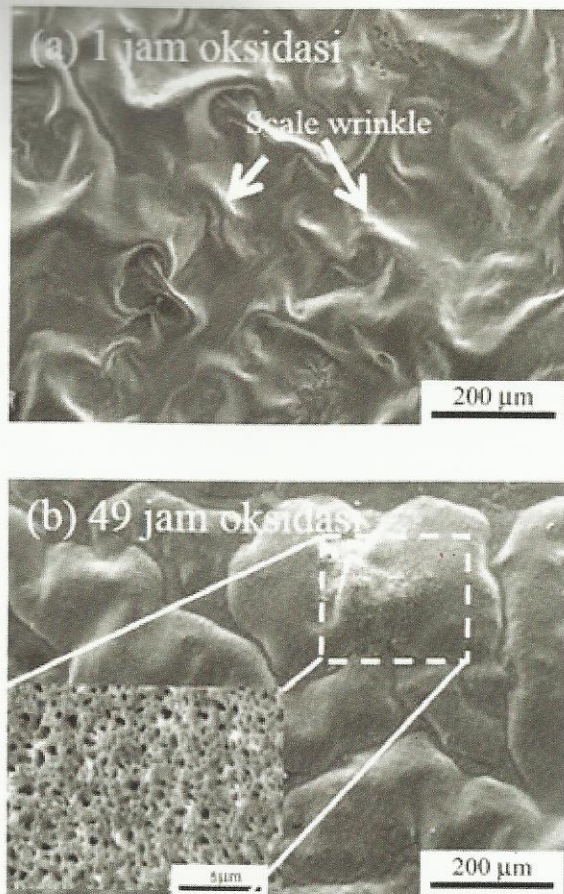
Gambar 3 dengan jelas menunjukkan tiga lapisan oksida besi yang terbentuk pada permukaan baja setelah dioksidasi pada temperatur 700°C selama 9 jam dengan lapisan FeO yang lebih tebal dibandingkan ketebalan lapisan Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 . Struktur oksida besi yang sama diamati oleh Chen dan Yuen [18], bahwa struktur oksida besi yang terbentuk setelah dioksidasi pada lingkungan udara terdiri dari tiga lapisan oksida hematit-magnetit-wustit pada permukaan baja karbon rendah. Ketebalan lapisan oksida besi yang terbentuk pada permukaan baja AISI 1020 yang dioksidasi

pada 700°C selama 9 jam adalah sekitar $57.6\ \mu\text{m}$ dan rasio ketebalan antara lapisan magnetit dan wustit adalah sekitar 1:5.5. Alasan yang mendasar untuk komposisi oksida yang terbentuk pada besi murni pada kisaran temperatur $700\text{--}1250^\circ\text{C}$ untuk rasio ketebalan 1:4:95 untuk hematit, magnetit dan wustit yang telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya [19,20], adalah bahwa difusi besi melalui lapisan oksida lebih mendominasi dari pada difusi oksigen di dalam wustit dan magnetit dibanding di dalam hematit. Rasio ketebalan antara wustit dan magnetit terutama ditentukan oleh perbedaan laju difusi besi dalam kedua lapisan tersebut. Prediksi teoritis rasio ketebalan lapisan antar wustit dan magnetit [19,20], dilakukan dengan menggunakan data difusi yang ada dari hasil eksperimen. Namun prediksi ketebalan relatif lapisan hematit, didasarkan atas data difusi besi dan oksigen signifikan lebih kecil dibanding data dari hasil eksperimen. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa difusi sirkuit pendek seperti difusi batas butir, didominasi oleh oksigen di dalam hematit selama oksidasi besi [20]. Perbedaan rasio ketebalan lapisan magnetit dan wustit yang dilaporkan pada penelitian ini didasarkan pada penambahan sekitar 0.5 wt.%Mn pada baja AISI 1020.

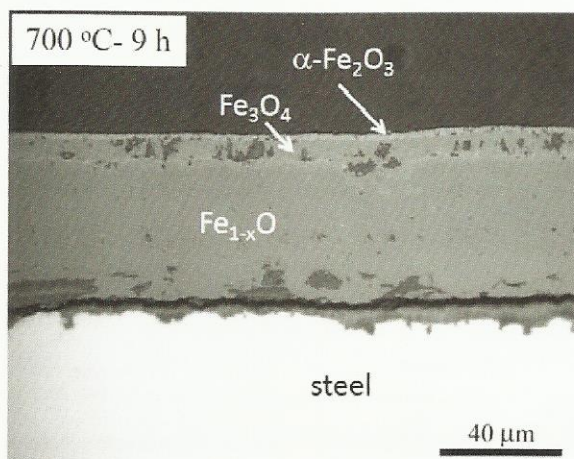
Hasil XRD mengkonfirmasi dengan jelas fasa oksida besi yang terbentuk pada baja AISI 1020 setelah dioksidasi pada temperatur 700°C selama periode waktu 1 dan 49 jam, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. XRD analisis pada lapisan oksida besi yang terbentuk mengungkapkan keberadaan hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) dan wustit (Fe_{1-x}O) dengan puncak intensiti yang tertinggi menunjukkan fasa oksida besi dari magnetit. Lapisan oksidasi antara hematit dan magnetit banyak menghasilkan struktur lapisan oksida besi yang berongga (porous). Hal ini menunjukkan bahwa difusi oksigen lebih mendominasi dari difusi atom-atom besi dalam lapisan hematit.

Seperti yang dilaporkan oleh Chen dan Yuen [18] bahwa penambahan 0.25 wt.% Mn pada baja karbon rendah ($C = 0.05\ \text{wt.}\%$) ditemukan Mn larut dalam wustit. Jika mangan larut dalam wustit, maka difusi

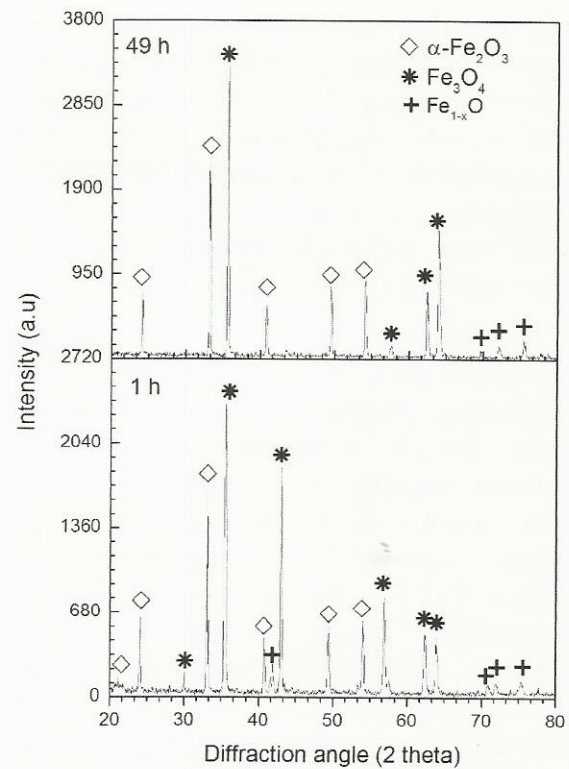
besi dalam lapisan wustit akan menjadi relatif lebih rendah atau rasio lapisan magnetit-wustit akan menjadi lebih kecil.



Gambar 2. SEM morfologi permukaan oksida besi yang terbentuk pada permukaan baja AISI 1020 yang dioksidasi pada 700 °C



Gambar 3. Mikroskop optik penampang permukaan oksida besi yang terbentuk pada baja AISI 1020 yang dioksidasi pada 700°C selama 9 jam



Gambar 4. Pola difraksi X-ray pada permukaanbaja AISI 1020 yang dioksidasi pada temperatur 700°C

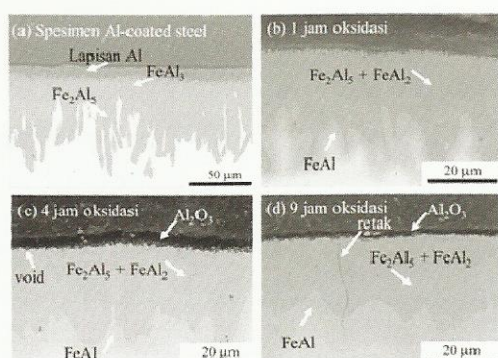
3.2.2. Baja AISI 1020 yang dilapisi aluminium

Foto mikro spesimen baja AISI 1020 yang dilapisi Al-celup panas pada temperatur 700°C selama 16 detik dapat dilihat pada Gambar 5a. Berdasarkan EDS analisis, komposisi atom Fe di dalam lapisan Fe_2Al_5 adalah sekitar 20-30 at.%. Sedangkan, komposisi atom Fe di dalam lapisan FeAl_3 adalah sekitar 5-15 at.%. Komposisi atom Fe yang paling rendah terbentuk pada lapisan aluminium terluar sekitar 1.5 at.%. Lapisan intermetalik yang terbentuk di atas substrat baja adalah lapisan Fe_2Al_5 dengan bentuk struktur kolumnar. Total tebal lapisan Al dan lapisan $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_3$ setelah proses Al-celup panas, masing-masing adalah sekitar 10 dan 75 μm .

Untuk mempelajari dengan jelas perilaku oksidasi baja AISI 1020 yang dilapisi Al-celup panas yang dikaitkan dengan transformasi fasa intermetalik terhadap peningkatan ketahanan oksidasi baja, dilakukan pengujian oksidasi pada temperatur 700°C selama periode waktu 1 sampai 49 jam. Untuk mengetahui fasa pada lapisan intermetalik dan aluminium oksida

yang terbentuk pada permukaan baja yang dilapisi Al setelah isothermal oksidasi, analisis komposisi kimia dilakukan dengan EDS (Table 2). Selain itu, observasi menggunakan SEM dilakukan pada setiap penampang permukaan lapisan intermetalik Fe-Al yang terbentuk, seperti ditunjukkan pada Gambar 5(b-d).

Oksidasi selama 1 jam, lapisan aluminium yang terluar pada baja lapis Al menghilang begitu juga lapisan tengah FeAl_3 . Setelah dioksidasi, atom-atom Al berdifusi ke dalam dan struktur kolumnar Fe_2Al_5 masih sangat jelas dapat dilihat pada lapisan intermetalik $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$. Hasil analisis XRD mengkonfirmasi lapisan intermetalik yang terbentuk setelah dioksidasi pada temperatur 700°C , yaitu Fe_2Al_5 , FeAl_2 dan FeAl , yang diindikasikan oleh puncak intensiti yang tinggi. Namun puncak intensiti yang rendah untuk alumina (Al_2O_3) ditemukan pada spesimen yang dioksidasi selama 1 jam (Gambar 6).



Gambar 5. (a) SEM morfologi penampang permukaan baja AISI 1020 yang dilapisi Al dan (b-d) setelah dioksidasi pada temperatur 700°C

Struktur kolumnar lapisan $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$ masih bisa diamati untuk oksidasi berlangsung selama 4 jam (Gambar 5c). Ini menunjukkan bahwa difusi ke dalam atom-atom Al ke dalam baja lebih dominan. Atom-atom Al dalam lapisan $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$ selama oksidasi berlangsung mempunyai peranan penting sebagai reservoir suplai Al untuk pembentukan lapisan protektif Al_2O_3 . Disamping itu juga Al berdifusi ke dalam baja, konsekuensinya kavitasi dan void terbentuk di bawah lapisan alumina, yang dapat diamati pada lapisan intermetalik $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$ bagian luar.

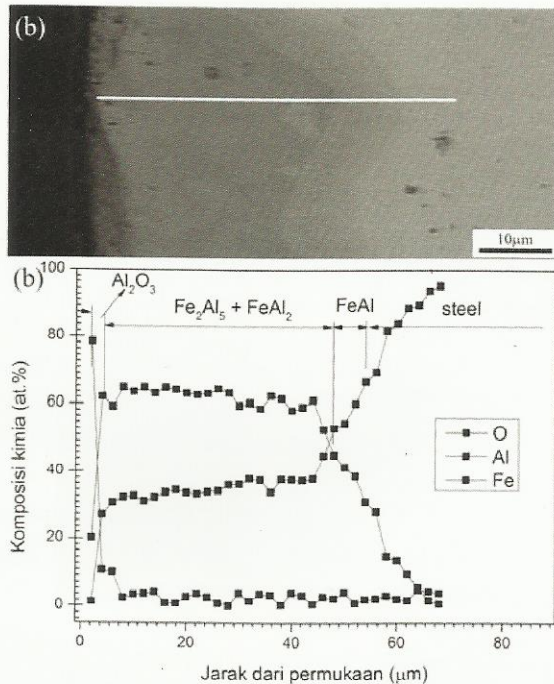
Hal yang menarik dari pembentukan

lapisan intermetalik Fe-Al selama proses oksidasi berlangsung 9 jam adalah transformasi fasa masuk ke dalam void yang menghasilkan retak menembus ketebalan lapisan intermetalik Fe-Al (Gambar 5d). Perbedaan koefisien termal dari setiap perbedaan ketebalan lapisan intermetalik yang terbentuk akan menghasilkan tegangan tarik [10,21]. Sebagaimana dapat diamati pada Gambar 5d, perbedaan ketebalan antara lapisan $\text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2$ dan FeAl cukup signifikan. Tegangan termal yang dihasilkan akan masuk ke dalam void yang dan akhirnya retak akan terbentuk. Retak yang terbentuk ini akan menjadi sumber degradasi lapisan pelindung alumina dan lapisan intermetalik Fe-Al yang gagal dalam proteksinya, dimana baja dapat langsung teroksidasi oleh oksigen di bawah lapisan intermetalik Fe-Al jika temperatur dan waktu oksidasi ditingkatkan [10].

Selain itu, struktur kolumnar dari Fe_2Al_5 berkurang dan menghilang, hal ini karena atom-atom besi dari substrat baja berdifusi keluar dan masuk ke dalam fasa Fe_2Al_5 dan juga difusi keluar atom-atom Al dari fasa Fe_2Al_5 . Konsekuensinya, lapisan FeAl_2 terbentuk antara lapisan Fe_2Al_5 lapisan dan FeAl dekat susbtrat baja (Gambar 5d). Difusi atom-atom Al yang berasal dari fasa Fe_2Al_5 keluar untuk membentuk lapisan Al_2O_3 juga menghasilkan fasa FeAl_2 . Sedangkan lapisan intermetalik FeAl terbentuk dikontrol oleh difusi atom-atom besi ke dalam Fe_2Al_5 [22]. Jika waktu oksidasi diperpanjang selama 49 jam, ketebalan lapisan FeAl dekat dengan baja akan semakin tebal (Gambar 6a). Hal ini menunjukkan bahwa difusi keluar atom-atom Fe semakin besar dan sebaliknya difusi ke dalam atom-atom Al semakin berkurang hingga kedalaman sekitar $60\ \mu\text{m}$ dari permukaan luar (Gambar 6b) dan komposisi atom Al dalam baja sekitar 5.99 at.%. Ketebalan lapisan intermetalik relatif sama untuk semua baja yang dilapisi hingga waktu oksidasi diperlama sampai 49 jam, yaitu sekitar $70\ \mu\text{m}$. Selain itu, bila waktu oksidasi diperpanjang selama 49 jam, puncak intensiti untuk Fe_2Al_5 menurun, sedangkan puncak intensiti yang tertinggi dimiliki oleh fasa FeAl (Gambar 7).

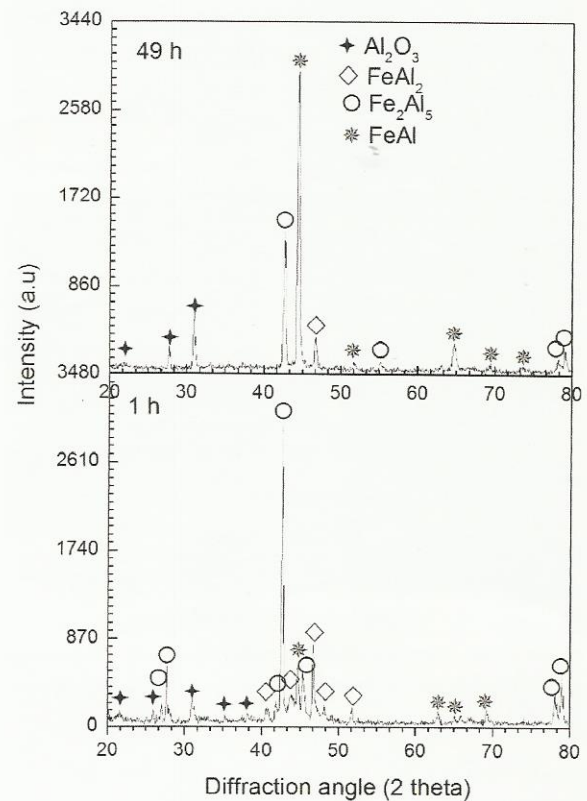
Tabel 2. Komposisi rerata fasa intermetalik dan aluminium oksida untuk baja lapis Al-celup panas setelah dioksidasi pada temperatur 700°C (at.%).

Fasa	0 h		1 h		9 h		49		
	Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al	O
FeAl ₃	7.95	2.05			—				
Fe ₂ Al ₅	3.48	6.52	6.85	3.15	2.92	67.08			
FeAl ₂			7.82	2.18	8.57	61.43			
FeAl			2.39	7.61	8.68	41.32			
Al ₂ O ₃					—		0.76	7.19	5.05



Gambar 6. (a) SEI penampang permukaan baja yang dilapisi Al setelah dioksidasi pada temperatur 700°C selama 49 jam, dan (b) EDS analisis yang menunjukkan elemen Fe, Al dan O pada lapisan intermetalik.

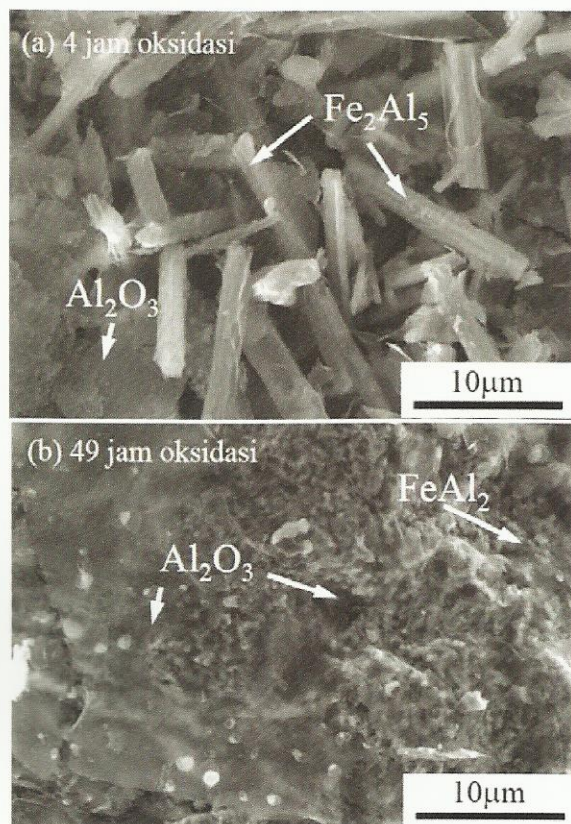
Sebagaimana disebutkan di atas, rendahnya laju kinetika oksidasi baja yang dilapisi aluminium adalah dikaitkan dengan pembentukan lapisan protektif tipis Al₂O₃ yang terbentuk di atas lapisan intermetalik Fe₂Al₅ + FeAl₂. Peningkatan ketahanan oksidasi baja yang dilapisi aluminium jelas sekali karena pembentukan lapisan protektif Al₂O₃ pada temperatur 700°C. Lapisan tipis Al₂O₃ sangat protektif dan berperan sebagai lapisan pelindung baja terhadap oksidasi. Sedangkan lapisan Fe₂Al₅ + FeAl₂ yang terbentuk pada permukaan baja akan menjadi suplai aluminium untuk pembentukan lapisan Al₂O₃.



Gambar 7. Pola difraksi X-ray analisis pada baja AISI 1020 yang dilapisi Al setelah dioksidasi selama 1 dan 49 jam pada temperatur 700°C

Lapisan Al₂O₃ selama oksidasi berlangsung mengambil peranan yang penting sebagai pengontrol laju oksidasi. Lapisan ini menghalangi difusi anion oksigen ke dalam, sehingga lapisan ini sangat tipis, namun lebih stabil dalam proteksi substrat baja selama aluminium pada permukaan baja masih tersedia sebanyak 5 at.% [13]. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8a, pembentukan lapisan protektif Al₂O₃ disuplai oleh fasa Fe₂Al₅ untuk waktu oksidasi sekitar 4 jam (Gambar 8a). Namun untuk waktu oksidasi selama 49 jam, pembentukan lapisan sudah digantikan oleh fasa FeAl₂ (Gambar 8b). Nampak jelas lapisan protektif Al₂O₃ menunjukkan lapisan yang padat. Hasil

analisis kuantitatif EDS menunjukkan komposisi kimia Al_2O_3 (at.%) yang terbentuk, ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 8. SEM yang menunjukkan morfologi permukaan baja AISI 1020 yang dilapisi Al setelah dioksidasi pada temperatur 700°C selama (a) 4 jam dan (b) 49 jam

4. Kesimpulan

Peningkatan ketahanan oksidasi baja AISI 1020 pada temperatur 700°C selama 49 jam telah dilakukan melalui proses pelapisan Al-celup panas. Hasil menunjukkan bahwa penerapan lapisan Al pada permukaan baja AISI 1020 memberikan nilai ekonomis yang tinggi untuk penggunaan lapisan pelindung. Hasil pengujian oksidasi menunjukkan bahwa struktur oksidasi besi yang terbentuk pada permukaan baja AISI 1020 adalah: hematit (Fe_2O_3) dengan struktur oksida yang mengkerut, berlobang dan tipis terbentuk pada bagian terluar lapisan oksida, lapisan tengah-magnetit (Fe_3O_4) dan lapisan oksida yang tebal- FeO . Sedangkan baja yang dilapisi Al-celup panas, lapisan intermetalik Fe-Al terbentuk adalah Fe_2Al_5 , FeAl_2 , dan Fe-Al. Pembentukan lapisan protektif Al_2O_3 disuplai oleh atom-atom Al dari fasa Fe_2Al_5

dan FeAl_2 . Lapisan protektif Al_2O_3 yang tipis, kompak dan padat memberikan perlindungan yang besar pada baja AISI 1020 pada temperatur 700°C selama 49 jam.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan dana penelitian melalui insentif riset SINas 2012 dengan nomor kontrak : 1.47 / SEK / IRS / PPK / I / 2012.

Daftar Pustaka

- [1] Ghosh, S.J., *Failure Analysis of a Jacking Oil Pump*, Failure Analysis and Prevention Vol.7, 2007, Hal.23-27.
- [2] Zehbour, P., Almeida, N. L., Sousa, R. M. F., Pimenta, G. S., and Marques, L. B. S, *Corrosion of Carbon Steel Pipes and Tanks by Concentrated Sulfuric Acid: A Review*, Corrosion Science, Vol. 58, 2012, Hal.1-11.
- [3] Cole, I. S., and Marney, D., *The Science of Pipe Corrosion: A Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils*, Corrosion Science, Vol.56, No.5, 2012.
- [4] Andi, E.P., Allan T., Salazar N., Julmar S., Haun S., and Toralde, *Corrosion Control in Geothermal Aerated Fluids Drilling Projects in Asia Pacific, Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, 25-30 April 2010, Indonesia, 2010.
- [5] Cédric, N. H., *Factors Affecting Costs Geothermal Power Development*, The Geothermal Energy Association for the U.S. Department of Energy USA, 2005.
- [6] Li, H., Liu, W., and Qi, X. *Evaluation of a Novel CaSO_4 Scale Inhibitor for a Reverse Osmosis System*, Desalination Vol.214, 2007, Hal.193-199.
- [7] Manoli, F., Kanakis, J., Malkaj, P., and Dalas, E. *The Effect of Amino Acids on the Crystal Growth of Calcium Carbonate*, Crystal Growth, Vol.236, No.1-3, 2003, Hal.363-370.
- [8] Donachy, J.E., and Sikes, *Thermal Polycondensation Synthesis of*

- Biomimetic Serine-Containing Derivatives Polyaspartate: Potential Inhibitors of Calcium Carbonate Phosphate Crystallisation*, Polymer Science, Vol.32, 1994, Hal.789-795.
- [9] Jones, F., Oliveria, A., Rohl, A. L., Parkinson, G. M., Odgen, M. I., and Reyhani, M. M. *Investigation Into Effect of Phosphonate Inhibitors on Barium Sulfate Precipitation*. Crystal Growth, Vol.237, No.1, 2002, Hal.424-429.
- [10] Chen, S.M., and Wang, C. J. *The High-Temperature Oxidation Behavior of Hot-Dipping Al-Si Coating on Low Carbon Steel*, Surface and Coatings Technology, Vol.200, 2006, Hal.6601-6605.
- [11] Dah, E. N., Tsipas, S., Hiero, M. P., and Perez, F. J., *Study of the Cyclic Oxidation Resistance of Al Coated Ferritic Steels with 9 and 12%Cr*. Corrosion Science, Vol.49, 2007, Hal.3700-3865.
- [12] Lee, K. S., Oh, K. H., Park, W. W., and Ra, R. Y. *Growth of Alumina Oxide Film in High Temperature Oxidation of Fe-20Cr-5Al Alloy Thin Strip*. Scripta Materialia, Vol.39, No.8, 1998, Hal. 1151-1155.
- [13] Wang, C.J., and Badaruddin, M., *The Dependence of High Temperature Resistance of Aluminized Steel Exposed to Water-Vapour Oxidation*. Surface and Coating Technology, Vol.205, 2010, Hal.1200-1205.
- [14] Badaruddin, M., and Wang, C.J. *Microstructure and High Temperature Oxidation of the Hot-Dipping Al-Si Coating on Low Carbon Steel in Ethanol, Water Vapor and Air at 700°C*, Advanced Materials Research, Vol.79-82, 2009, Hal.1775-1778.
- [15] Pieraggi, B. *Calculations of Parabolic Reaction Rate Constants*. Oxidation of Metals, Vol.27, 1987, Hal.177-185.
- [16] Jha, R., Haworth, C. W. and Argent, B. B. *The Formation of Diffusion Coatings on Some Low-Alloy Steels and Their High Temperature Oxidation Behaviour: Part 2, Oxidation Studies*, Calphad, Vol.25, 2001, Hal.667-689.
- [17] Chen, R.Y., and Yuen, W.Y.D., *Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen*, Oxidation of Metals, Vol.59, 2003, Hal.433-468.
- [18] Chen, R. Y., and Yuen, W. Y. D., *Oxidation of Low-Carbon, Low-Silicon Mild Steel at 450–900°C Under Conditions Relevant to Hot-Strip Processing*, Oxidation of Metals, Vol. 57, 2002, Hal.53-79.
- [19] Hsu, H. S., *The Formation of Multilayer Scales on Pure Metals*, Oxidation Metals, Vol.26, 1986, Hal.315–332.
- [20] Garnaud, G., and Rapp, R.A., *Thickness of the Oxide Layers Formed During the Oxidation of Iron*, Oxidation Metals, Vol.11, 1977, Hal.193-198.
- [21] Chang, Y. Y., Tsaur, C. C., and Rock, J. C., *Microstructure Studies of an Aluminide Coating on 9Cr-1Mo Steel during High-Temperature Oxidation*, Surface Coating Technology, Vol.200, No.65, 2006, Hal.88–93.
- [22] Kobayashi, S., and Yakou, T., *Control of Intermetallic Compound Layers at Interface Between Steel and Aluminum by Diffusion-Treatment*, Materials Science and Engineering A, Vol.338, 2002, Hal.44-53.